

FENÓMENOS FÍSICOS DE LAS NANOPARTÍCULAS DE ORO

Carlos Luna Criado
Diana Castañeda Rodríguez
Rafael Alberto Rosas Torres
Blanca Patricia Sánchez Juárez

UANL-FCFM

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Raquel Mendoza Reséndez

UANL-FIME

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

Resumen:

El oro ha sido uno de los materiales más preciados por el hombre desde la antigüedad por sus excelentes propiedades, entre las que destaca su hermoso color y brillo, su maleabilidad y su estabilidad química. En las últimas décadas, el interés por este material se ha incrementado al encontrar que el oro en forma de nanopartículas presenta fenómenos físicos nuevos que incrementan su potencial tecnológico. En esta contribución presentamos una breve descripción de algunos de estos fenómenos, los cuales son objeto de estudio del cuerpo académico Física de los sistemas de baja dimensionalidad y sus aplicaciones de la FCFM de la UANL.

Palabras claves:

oro, nanoestructuras, nanomateriales

Introducción

Aunque el oro es uno de los materiales más conocidos y utilizados desde la antigüedad, no ha dejado de atraer fuertemente la atención de la comunidad científica debido a sus excelentes propiedades. El oro es un metal de transición que tiende a aparecer en su estado metálico (tiene potenciales de reducción estándar altos y positivos [1], siendo en este estado poco reactivo, por lo cual presenta una gran estabilidad química y una notable resistencia a la corrosión. Además, el oro es el metal más dúctil y maleable. Estas propiedades, junto al característico color amarillo brillante que presenta en su estado masivo han hecho que el oro pertenezca, junto a la plata, el platino y el rodio, al grupo los metales máspreciado en los trabajos de joyería. Por otro lado es un excelente conductor de electricidad y calor.

La baja reactividad del oro lo convierte en el metal más inocuo para la salud humana. De hecho, aunque poco utilizado, se emplea en su estado metálico como un colorante alimentario en alta gastronomía (Codex Alimentarius E-175), y en particular, como un añadido decorativo de algunas bebidas alcohólicas (tales como la bebida polaca *Goldwasser de Danzig* o algunos vinos como el *Centvum Vitis*). Por otro lado, su uso terapéutico anti-inflamatorio en dolencias como la artritis reumatoide parece muy prometedor [2,3]. No obstante, cabe señalar que algunas de sus sales, tales como el cloruro de oro, sí presentan toxicidad.

Recientemente, el interés por este material en forma de partículas de tamaño nanométrico se ha visto renovado y fortalecido debido a los comportamientos físicos que exhiben estos sistemas, que son muy diferentes a los observados en el oro a escala macroscópica y los cuales presentan nuevas dependencias con el

tamaño y forma del material. De este modo, el estudio de esta nueva fenomenología resulta fundamental para el entendimiento de los efectos colectivos, superficiales y de confinamiento responsables de las propiedades y fenómenos únicos de los sistemas de baja dimensionalidad, y que podría explotarse en el diseño de nuevos dispositivos y tecnologías así como el desarrollo de nuevas técnicas terapéuticas y de diagnóstico [4].

En este trabajo presentamos una breve descripción de algunos fenómenos físicos asociados a las nanoestructuras de oro, mostrando algunos resultados obtenidos por nuestro grupo de investigación. Todas las figuras presentadas son originales y no se han publicado previamente.

Resonancia de plasmones superficiales

En los metales existe una gran cantidad de electrones (digamos del orden del número de Avogadro, $\approx 10^{23}$) que no se encuentran ligados a un determinado núcleo atómico, de modo que se pueden mover libremente dentro del material formando un **plasma**. Con la aplicación de campos eléctricos, estos electrones fluyen a través del material dando lugar al fenómeno de la conducción eléctrica. Cuando se hace incidir radiación electromagnética (i.e. campos electromagnéticos oscilantes) sobre los metales, se pueden inducir excitaciones colectivas de los electrones libres, denominadas **plasmones**. Estas ondulaciones electrónicas se pueden propagar en la interfase de un metal y un material dieléctrico dando lugar a un **plasmón superficial**. Cuando la frecuencia de la radiación incidente coincide con la frecuencia resonante de la oscilación colectiva de los electrones de conducción, se produce un fenómeno de absorción. En el caso de metales con baja dimensionalidad (películas delgadas y metales nanométricos), la resonancia del plasmón (que llamaremos **resonancia del plasmón superficial localizado, LSPR** según sus siglas en inglés Localized Surface Plasmon Resonance) presenta una frecuencia característica fuertemente dependiente del tamaño y forma del material debido a efectos de confinamiento [4]. En el caso de las nanoestructuras de los metales nobles como el oro y la plata, la banda de extinción LSPR cae dentro del espectro visible, de modo que estas nanoestructuras presentan colores diferentes a los observados en sus análogos macroscópicos y que pueden variar según el tamaño de partícula.

A modo de ejemplo ilustrativo, en la **Figura 1A** se muestra el espectro ultravioleta-visible de una suspensión coloidal de nanopartículas de oro. En la imagen interior se muestra una fotografía de este coloide donde se aprecia su color rosáceo, el cual es

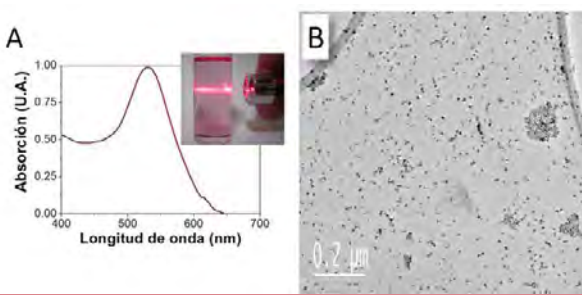


Figura 1. A) Espectro ultravioleta-visible de una suspensión coloidal de nanopartículas de oro. La imagen interior es una fotografía de la muestra estudiada donde se evidencia la presencia de partículas mediante el efecto Tyndall. B) Imagen de microscopía electrónica de transmisión de la misma muestra.

muy diferente del color dorado del oro en bulto. En esta fotografía se puede observar que la suspensión presenta el efecto Tyndall al hacerla incidir un haz láser. En la **Figura 1B** se muestra una micrografía de microscopía electrónica de transmisión (MET) de la misma muestra, donde se evidencia la uniformidad, la morfología esférica y el pequeño tamaño de las partículas presentes en la suspensión (su diámetro promedio es de 6 ± 2 nm).

Aunque la naturaleza de este fenómeno debe describirse en el contexto de la mecánica cuántica, donde se tratan a los plasmones como cuasi-partículas, los procesos de absorción, dispersión y extinción derivados de los plasmones superficiales pueden describirse cuantitativamente empleando el modelo teórico que Mie desarrolló en 1908 [5], basado en la teoría electromagnética clásica. En la siguiente sección describiremos brevemente este modelo.

Teoría de Mie de la dispersión y absorción de la luz por partículas pequeñas

Cuando se hace incidir luz sobre una partícula metálica, su campo electromagnético induce una excitación colectiva en los electrones de valencia de la partícula, por lo que la partícula a su vez irradiará radiación electromagnética dando lugar a un proceso de dispersión. Por otro lado, en el proceso de transferencia de energía de la luz a la partícula, parte de la energía se disipa en forma de calor. A este proceso se le denomina absorción. Para describir teóricamente este problema físico, consideremos las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \rho_l(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}_l(\mathbf{r}, t) + \partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) / \partial t \quad (4)$$

siendo ρ_l y \mathbf{J}_l las densidades de carga y corriente asociadas a los electrones libres o de conducción.

Las condiciones de contorno asociadas a estas ecuaciones son:

$$\hat{n} \times [\mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) - \mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t)]_{\text{frontera}} = \mathbf{0} \quad (5)$$

$$\hat{n} \times [\mathbf{H}_2(\mathbf{r}, t) - \mathbf{H}_1(\mathbf{r}, t)]_{\text{frontera}} = \mathbf{K}_l \quad (6)$$

$$\hat{n} \cdot [\mathbf{D}_2(\mathbf{r}, t) - \mathbf{D}_1(\mathbf{r}, t)]_{\text{frontera}} = \sigma_l \quad (7)$$

$$\hat{n} \cdot [\mathbf{H}_2(\mathbf{r}, t) - \mathbf{H}_1(\mathbf{r}, t)]_{\text{frontera}} = 0 \quad (8)$$

siendo σ_l y \mathbf{K}_l las densidades de carga y corriente asociadas a las cargas libres de la superficie frontera y \hat{n} el vector unitario normal a dicha superficie.

Las ecuaciones (1)-(4) se pueden desacoplar dando lugar a ecuaciones de ondas que describen a la radiación electromagnética en un medio material. De este modo, los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética plana y monocromática (con longitud de onda λ) que se propaga en un medio determinado con permitividad eléctrica ϵ y permeabilidad magnética μ son soluciones de las ecuaciones de onda:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad \text{y} \quad \nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (9)$$

donde $k = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}}{\lambda} = \omega\sqrt{\epsilon\mu} = \omega n$ es el número de ondas de la onda en el medio en cuestión. En muchos medios, μ toma un valor cercano a 1 y por tanto, $n \approx \sqrt{\epsilon}$. En la frontera entre la partícula metálica y el medio en el que se encuentra inmersa, tanto ϵ como μ cambiarán bruscamente presentando una discontinuidad. En el caso de partículas con morfología esférica, las ecuaciones del problema se pueden resolver analíticamente cuyas soluciones fueron propuestas por primera vez por Mie [5]. A partir de estas soluciones se puede calcular las secciones eficaces de absorción (σ_{abs}), dispersión (σ_{dis}) y de extinción (σ_{ext}), siendo esta última la suma de las dos primeras. De acuerdo a esta teoría, para una partícula esférica metálica de radio r_0 con una permitividad eléctrica $\epsilon_p = n_p^2$ (la cual debe expresarse con números complejos en las partículas metálicas para poder describir el fenómeno de absorción), que se encuentra inmersa en un medio con permitividad $\epsilon_m \approx n_m^2$ y en la cual incide una onda electromagnética plana con frecuencia $\omega = 2\pi/\lambda = k/n_m$, las secciones eficaces σ_{dis} , σ_{abs} y σ_{ext} se pueden calcular mediante las siguientes series:

$$\sigma_{\text{dis}} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{j=1}^{\infty} (2j+1) \text{Re}(a_j + b_j) \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{ext}} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{j=1}^{\infty} (2j+1) (|a_j|^2 + |b_j|^2) \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{abs}} = \sigma_{\text{ext}} - \sigma_{\text{dis}} \quad (12)$$

donde :

$$a_j = \frac{m \psi_j(mx) \psi_j'(x) - \psi_j(x) \psi_j'(mx)}{m \psi_j(mx) \xi_j'(x) - \xi_j(x) \psi_j'(mx)} \quad (13)$$

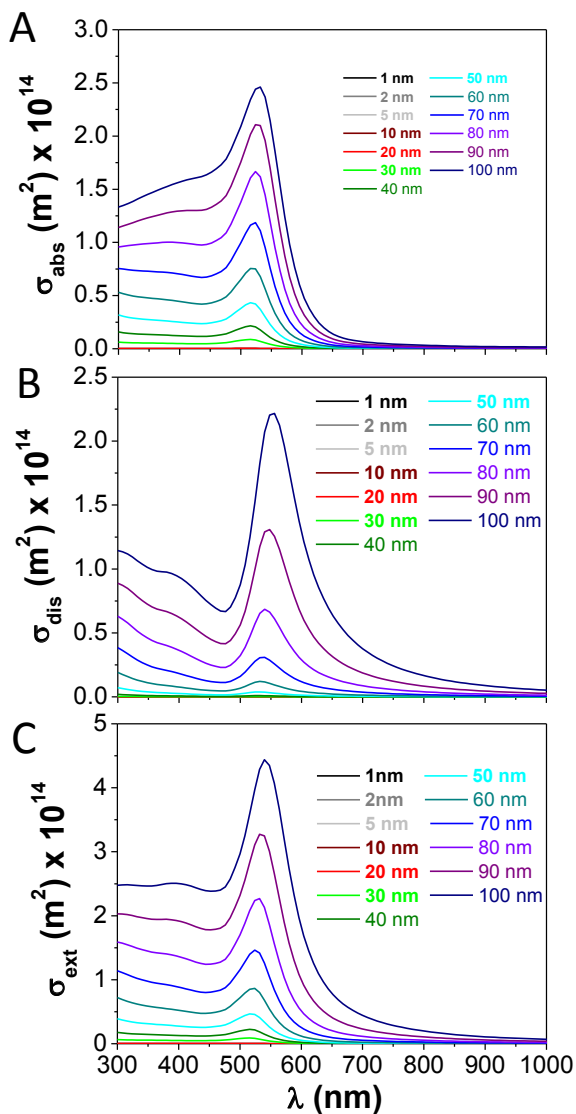


Figura 2. Valores calculados (a partir de la teoría de Mie) de las secciones eficaces σ_{abs} , σ_{dis} y σ_{ext} de nanopartículas de oro de diversos tamaños (1-100 nm) dispersadas en agua en función de la longitud de onda de la radiación incidente

$$b_j = \frac{\psi_j(mx)\psi_j'(x) - m\psi_j(x)\psi_j'(mx)}{\psi_j(mx)\xi_j'(x) - m\xi_j(x)\psi_j'(mx)} \quad (14)$$

siendo $m = n_p/n_m$ y $x = 2\pi r_0/\lambda$.

Las funciones ψ_j y $\xi_j(x)$ son las funciones Ricatti-Bessel, que son soluciones de la ecuación diferencial:

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + [x^2 - j(j+1)]y = 0 \quad (15)$$

y que se pueden definir como:

$$\psi_j(x) = \sqrt{\frac{\pi x}{2}} J_{j+\frac{1}{2}}(x) \quad (16)$$

$$\xi_j(x) = \sqrt{\frac{\pi x}{2}} \left[J_{j+\frac{1}{2}}(x) + i Y_{j+\frac{1}{2}}(x) \right] \quad (17)$$

donde J_α y Y_α son las funciones de Bessel de primer y segundo orden, respectivamente.

Las funciones con primas, ψ_j' y ξ_j' , indican derivadas de las funciones con respecto al argumento en paréntesis y se pueden expresar del modo siguiente:

$$\psi_j'(x) = \psi_{j-1}(x) - \frac{n}{x} \psi_j(x) \quad (18)$$

$$\xi_j'(x) = \xi_{j-1}(x) - \frac{n}{x} \xi_j(x) \quad (19)$$

Estas ecuaciones nos permiten estimar las dependencias de σ_{abs} , σ_{dis} y σ_{ext} en función del material de la partícula y su diámetro, el medio en el que se encuentra y la longitud de onda de la radiación incidente. En la **Figura 2** presentamos los valores estimados de σ_{abs} , σ_{dis} y σ_{ext} en función de la longitud de onda de la radiación incidente para nanopartículas de oro de diversos tamaños (1-100 nm) dispersadas en agua ($n_m=1.33$).

Es importante destacar que la banda de absorción debida al fenómeno de LSPR puede verse modificada significativamente si la nanopartícula es dopada con otro metal. También puede modificarse recubriendo las partículas iniciales con otro metal noble, confiriendo a la partícula una estructura tipo corazón-coraza. También la modificación de la forma de las nanopartículas da lugar a importantes variaciones en la banda de extinción LSPR, de hecho una morfología anisotrópica suele dar lugar a la aparición de varias bandas de extinción [6]. También es muy susceptible a la variación de las propiedades

del entorno de las nanopartículas (índice de refracción local, etc.) y su estado de agregación [4,7]. Este hecho hace que las nanopartículas de oro sean muy útiles en el desarrollo de sensores. De este modo, por ejemplo, se puede explotar la sensibilidad del espectro LSPR a los cambios en el índice de refracción local para la detección de moléculas suspendidas en un medio líquido y que tiendan a adherirse a la superficie de las partículas de oro. Aunque Estas últimas son muy poco reactivas, tienden a adsorber moléculas formando enlaces tipo Au-S. Este método de reconocimiento molecular se podría emplear para detectar sistemas tales como enzimas, anticuerpos, agente tóxicos o ADN con concentraciones del orden de ~ 1 pM [4].

Dispersión Raman enaltecida por superficies

Otro fenómeno interesante que presentan las nanopartículas de oro y que está siendo crucial para el desarrollo de nuevos biosensores, es el enaltecimiento de la dispersión Raman producido al anclar las moléculas de un espécimen a analizar sobre una superficie de oro o plata. En este aspecto es importante destacar que las nanopartículas, debido a sus pequeñas dimensiones, presentan una alta relación superficie/volumen que aumenta dramáticamente con la reducción de su tamaño.

El efecto Raman consiste en la dispersión inelástica de fotones provenientes de un láser incidente sobre una muestra. Dicha dispersión se origina debido a la interacción de los fotones con las moléculas de la muestra, la cual depende de las frecuencias características de los modos de vibración de dichas moléculas. Por tanto, este fenómeno de dispersión puede emplearse para el análisis químico y estructural de un compuesto. Sin embargo, un inconveniente de esta técnica analítica es que tan solo un fotón de cada 10^8 fotones incidentes es dispersado inelásticamente [8], y la sección eficaz de la dispersión Raman es considerablemente pequeña (del orden de 10^{-30} - 10^{-25} cm² por molécula) [9], por lo que en principio se requieren grandes cantidades de muestra para hacer estos análisis. No obstante, se ha encontrado que la intensidad de este fenómeno puede incrementarse en un factor de 10^2 - 10^4 cuando la frecuencia del láser excitador coincide con la frecuencia de resonancia de alguna transición electrónica de la molécula, dando lugar a **la dispersión Raman resonante** [8].

Por otro lado, desde el descubrimiento de Fleischmann y colaboradores [10] se sabe que la intensidad de este fenómeno puede amplificarse en 5 o 6 órdenes de magnitud cuando las moléculas están adsorbidas o en contacto con ciertas superficies metálicas tales como la plata o el oro. Esto hace que se reduzca

considerablemente el número requerido de moléculas para su estudio por dispersión Raman, hasta poder lograr detecciones de una sola molécula aislada [11]. **El efecto Raman enaltecido por superficies** (conocido por sus siglas en inglés SERS, Surface Enhanced Raman Scattering), puede originarse principalmente mediante mecanismos químico-electrónicos o electromagnéticos [11,12]. En el primer mecanismo, el enaltecimiento de la señal en este caso parece producirse debido al acoplamiento electrónico entre las moléculas adsorbidas y la superficie metálica, habiendo una transferencia de cargas dinámica en la interfase molécula/metal [13]. Los factores de enaltecimiento estimados debido a este mecanismo son relativamente pequeños (entre 10 y 100) [14]. En el segundo mecanismo, el enaltecimiento del efecto Raman ocurre debido al acoplamiento de los modos de vibración moleculares con los plasmones superficiales excitados en la superficie metálica por los fotones incidentes [15].

Magnetización espontánea en nanoestructuras de oro

Otro aspecto sorprendente de las nanopartículas de oro, descubierto recientemente [16], es que cuando están estabilizadas con moléculas mediante un enlace oro-azufre pueden presentar comportamientos magnéticos muy diferentes al diamagnetismo observado en el oro masivo. De esta forma, estas nanopartículas presentan histéresis magnética independiente de la temperatura, algo inusual incluso para partículas pequeñas de un material ferromagnético, las cuales si son lo suficientemente pequeñas exhiben un comportamiento superparamagnético a temperatura ambiente y campos coercitivos altos a bajas temperaturas.

El origen de este comportamiento no se ha esclarecido aún por completo, sin embargo este fenómeno parece estar relacionado con los cambios en la configuración electrónica de las nanopartículas de oro producido por el enlace Au-S con las moléculas del ligando [17,18].

Auto-organización de nanopartículas de oro en superestructuras con ordenamientos cristalinos

Las nanopartículas de oro coloidales uniformes recubiertas con agentes surfactantes estabilizantes, pueden auto-ensamblarse en arreglos con simetrías cristalinas bien definidas que pueden considerarse como supercristales o cristales supramoleculares, donde las nanopartículas de oro desempeñan el papel de bloques de construcción [19]. Esta organización espontánea de nanocristales coloidales en redes bi- o tri-dimensionales sin duda representa uno de los fenómenos

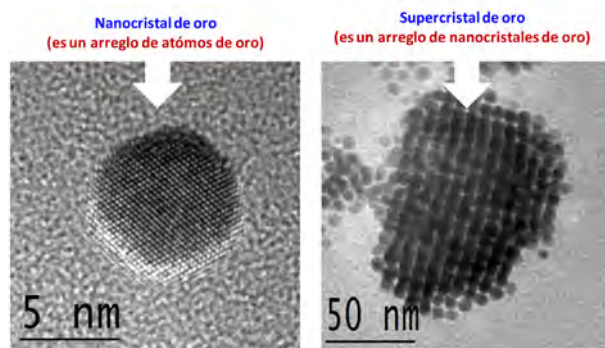


Figura 3. La imagen de la izquierda es una imagen MET de alta resolución de una nanopartícula de oro monocristalina. Los puntos que se observan corresponden a átomos. En la imagen de la derecha se muestra un agregado de nanopartículas de oro con simetría cristalina. Cada punto corresponde a una nanopartícula.

más interesantes observados en los nanomateriales con mayor relevancia tecnológica.

En la **Figura 3** se muestra a modo ilustrativo, una imagen MET con resolución atómica de una nanopartícula monocristalina de oro. En ella se evidencia claramente el arreglo atómico. En la misma figura también se presenta una imagen MET de nanopartículas de oro agregadas espontáneamente formando una estructura supramolecular, donde las nanopartículas juegan el papel de unidades de construcción. Es interesante remarcar que estas nanopartículas están ensambladas con la misma simetría cristalina (estructura cúbica centrada en las caras) que la encontrada en el ensamblaje de los átomos de oro para formar cada una de las nanopartículas.

La formación de estos supercristales puede explotarse como una herramienta extraordinariamente poderosa para el diseño de nuevos materiales con propiedades únicas y controlables, siendo de crucial importancia para el diseño de nuevos dispositivos tecnológicos donde las unidades activas sean nanocomponentes. Por otra parte, nos permite inferir principios generales subyacentes en la forma en la que la materia se auto-ensambla en diferentes estructuras jerarquizadas. Sin embargo, cabe destacar que, dada la complejidad del fenómeno resulta difícil establecer teóricamente en qué condiciones experimentales se obtienen arreglos de nanocristales con una simetría determinada en un sistema real.

Recientemente se ha encontrado que cuando las plataformas metálicas empleadas en el fenómeno SERS son nanopartículas formando un supercristal, las excitaciones plasmónicas generadas por el acoplo de

los dipolos de nanopartículas que forman el agregado producen un enaltecimiento aún mayor de la dispersión Raman como resultado del fuerte confinamiento de los campos ópticos entre las partículas agregadas [13,15], convirtiendo el fenómeno SERS el principio fundamental de la tecnología de sensores con capacidad de detección a nivel molecular.

Conclusiones

Los materiales nanoestructurados, y en particular las nanopartículas de oro, presentan propiedades y fenómenos físicos nuevos de gran interés científico y tecnológico. Algunos de los que más han atraído la atención de la comunidad científica y que están siendo estudiados con mayor empeño son los efectos de tamaño finito de la resonancia del plasmón superficial localizado, el enaltecimiento de la dispersión Raman por superficies, magnetismo permanente en nanoestructuras de oro y la formación espontánea de estructuras cristalinas supramoleculares. No obstante, cabe destacar que el origen de todos estos fenómenos físicos no está completamente esclarecido y que son temas de actual discusión y de controversia, de modo que su estudio podría revelar nuevos principios físicos aún por descubrir.

Agradecimientos

Los autores agradecen al M.C. Enrique Díaz Barriga Castro por su valiosa colaboración en la adquisición de micrografías MET. También agradecen a las autoridades de la UANL-FCFM su confianza y apoyo. Asimismo, se agradece a la Secretaría de Educación Pública (SEP-PROMEP) su apoyo al cuerpo académico **Física de los Sistemas de baja Dimensionalidad y sus Aplicaciones (UANL-CA-305)** a través del proyecto **Detección de biomoléculas y patógenos a nivel molecular mediante el efecto Raman enaltecido por nanoestructuras de oro y plata**. A la vez, se agradece a la UANL el apoyo recibido a través del proyecto PAICYT-CE793-11.

Referencias

- [1] Lide, D. R. (Editor), *CRC Handbook of Chemistry and Physics 2006-2007*. Taylor and Francis Group LLC. 2007.
- [2] Davis, P. "Auranofin". *Clin. Rheum. Dis.* Vol.10, pp. 341-351. 1984.
- [3] Kean, W. F. , and Kean, I. R. "Clinical pharmacology of gold". *Inflammopharmacology.* Vol.16, pp. 112-125. Jun. 2008.
- [4] Daniel, M. C. and Astruc, D. "Gold nanoparticles: Assembly, supramolecular chemistry, quantum-size- related properties, and applications toward biology, catalysis and nanotechnology". *Chem. Rev.* Vol.104, pp.293-346. Ene. 2004.
- [5] Mie, G. "Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen". *Ann. Phys.* Vol.25, pp. 377-445. 1908.
- [6] Wang, H., Brandl, D. W. Le, F., Nordlander, P. and Halas, N. J. "Nanorice: A Hybrid Plasmonic Nanostructure". *Nano Letters.* Vol.6, pp. 827-832. Feb.2006.
- [7] Brust, M. and Kiely, C. J. "Some recent advances in nanostructure preparation from gold and silver particles: a short topical review". *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* Vol.202, pp. 175-186. Abr. 2002.
- [8] Campion, A. and Kambhampati, P. "Surface-enhanced Raman scattering". *Chemical Society Reviews.* Vol.27, pp. 241-250. Jul.1998.
- [9] Skinner, J.G. and Nilsen, W. G. "Absolute Raman Scattering Cross-Section Measurement of the 992 cm⁻¹ Line of Benzene". *Journal of the Optical Society of America.* Vol.58, pp. 113-118. 1968.
- [10] Fleischmann, M., Hendra, P. J. and McQuilla, A. J. "Raman-Spectra of Pyridine adsorbed at a Silver Electrode". *Chemical Physics Letters.* Vol 26, pp.163-166. 1974.
- [11] Kneipp, K., Wang, Y. , Kneipp, H., Perelman, L. T., Itzkan, I., Dasari, R., and Feld, M. S. "Single molecule detection using surface-enhanced Raman scattering (SERS)". *Phys. Rev. Lett.* Vol.78, pp 1667-1670. Mar. 1997.
- [12] Lombardi, J. R., Birke, R. L., Lu, T.H. and Hu, J. "Charge-Transfer Theory of Surface Enhanced Raman-Spectroscopy-Herzberg-Teller Contributions". *J. Chem. Phys.* Vol.84, pp. 4174-4180. Abr. 1986.
- [13] Haslett, T. L., Tay, L. and Moskovits, M. J. "Can surface-enhanced Raman scattering serve as a channel for strong optical pumping?". *Chem Phys.* Vol.113, pp. 1641-1646. Jul. 2000.
- [14] Otto, A., *Light scattering in solids IV: Electronic Scattering, Spin Effects, SERS and Morphic Effects*, M. Cardona and G. Güntherodt (Editores). Springer: Berlin. 1984.
- [15] Kneipp, K., Kneipp, H., Itzkan, I., Dasari, R. and Feld, M.S. "Surface-enhanced Raman scattering and biophysics". *J. Phys.-Cond. Matter.* Vol.14, pp. R597-R624. May. 2002.
- [16] Crespo, P., Litrán, R., Rojas, T. C., Multigner, M. de la Fuente, J. M., Sánchez-López, J. C., García, M. A., Hernando, A., Penadés, S. and Fernández, A. "Permanent magnetism, magnetic anisotropy, and hysteresis of thiol-capped gold nanoparticles". *Phys. Rev. Lett.* Vol.93. 087204. Ago. 2004.
- [17] Zhang, P. and Sham, T. K. "Tuning the electronic behavior of Au nanoparticles with capping molecules". *Appl. Phys. Lett.* Vol.81, pp. 736-738. Jul. 2002.
- [18] Zhang, P. and Sham, T. K. "X-ray studies of the structure and electronic behavior of alkanethiolate-capped gold nanoparticles: The interplay of size and surface effects". *Phys. Rev. Lett.* Vol. 90, 245502. Jun. 2003.
- [19] Stoeva, S. L. Prasad, B. L. V. Uma, S. Stoimenov, P.K., Zaikovski, V., Sorensen, C. M. and Klabunde, K. J. "Face-centered cubic and hexagonal closed-packed nanocrystal superlattices of gold nanoparticles prepared by different methods". *J. Phys. Chem. B.* Vol. 107, pp. 7441-7448. Jul. 2003

Datos de los Autores:

Cuerpo académico Física de los Sistemas de baja Dimensionalidad y sus Aplicaciones (UANL-CA-305)

El objetivo principal de este cuerpo académico (CA) de la FCFM de la UANL es el de cubrir vacíos de conocimiento en diferentes aspectos fundamentales relacionados con la Física de los Materiales de baja dimensionalidad, la cual es una parte de la Física del estado sólido en pleno desarrollo. Para ello, llevamos a cabo investigaciones que inician desde la preparación de los materiales a estudiar (con el desarrollo, implementación y perfeccionamiento de diversas técnicas de síntesis), y continúan con el estudio experimental y la modelización teórica de las propiedades y fenómenos físicos asociados a estos materiales. Asimismo, buscamos desarrollar nuevas aplicaciones tecnológicas con el conocimiento generado, especialmente en las áreas de la biomedicina y la tecnología medioambiental.

Para lograr llevar a cabo con éxito estas investigaciones, se buscó una configuración del CA multidisciplinar. De este modo, entre los miembros y colaboradores de este cuerpo académico se encuentran físicos, ingenieros químicos, ingenieros informáticos, biólogos y químicos fármaco-biólogos. Sus miembros actuales son: Dr. Carlos Luna Criado (UANL-FCFM, líder del CA), Dra. Raquel Mendoza Reséndez (UANL-FIME), M.C. Rafael Alberto Rosas Torres (UANL-FCFM), M.C. Blanca Patricia Sánchez Juárez (UANL-FCFM) y M. T. Diana Castañeda Rodríguez (UANL-FCFM).

Dirección de los autores: Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 66450, México.

Email: carlos.lunacd@uanl.edu.mx